

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonstrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto
Heidi Silvennoinen

Opinnäytetyö

Perustaminen paalujen varaan – pystysuoran paaluryhmän paalukuormien laskeminen

Työn ohjaaja tekniikan lisensiaatti Olli Saarinen
Työn tilaaja Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen, valvojana RI Jukka Ukko
Tampere 2/2012

Tampereen ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Talonrakennustekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä	Heidi Silvennoinen
Työn nimi	Perustaminen paalujen varaan – pystysuoran paaluryhmän paalukuormien laskeminen
Sivumäärä	41 sivua
Valmistumisaika	02/2012
Työn ohjaaja	Tekniikan lisensiaatti Olli Saarinen
Työn tilaaja	Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen, RI Jukka Ukko

TIIVISTELMÄ

Kun rakennus perustetaan alueelle, jossa maanvarainen perustus ei ole mahdollinen, perustamistapana käytetään paaluperustusta. Työn tilaaja toimii rakennesuunnittelijana useassa kohteessa, jossa rakennus perustetaan paalujen varaan. Paaluperustuksen suunnittelussa on noudatettava tiettyjä määräyksiä, ohjeita ja suosituksia. Niiden avulla voidaan suunnitella ja mitoittaa paaluperustus, joka kantaa rakenteista tulevat kuormitukset.

Yksittäiselle paalulle on määritettävissä suurin sallittu kuorma, joka määritellään paalun ominaisuuksien ja toimintatavan mukaan. Asuinkerrostalossa voi olla monta sataa paalua, ja niiden jokaisen saaman kuormituksen laskeminen on aikaa vievää. Lisäksi rakennustyömaalla tehtävässä paalutustyössä tulee todella herkästi virheitä, jolloin paaluille tulevia kuormia joudutaan laskemaan uudestaan.

Tilaaja halusi laskentataulukon, joka laskee pystysuoran paaluryhmän paaluille paalukuormat. Tavoitteena oli tehdä yksinkertainen ja selkeä taulukko, johon syötetään paalujen sijaintitiedot ja paaluryhmälle tulevat kuormitukset. Taulukkoon haluttiin myös tasokuva ja leikkaukset paaluryhmästä, jotka muuttuvat lähtötietojen muuttuessa. Tarkoituksena oli tehdä taulukko, joka nopeuttaa suunnittelu- ja mitoitusyötä ja toisaalta vähentää virheiden määrää laskentatyössä.

Laskentataulukko tehtiin Excel-ohjelmalla. Taulukko tehtiin vain työn tilaajan käyttöön, joten sitä esitellään työssä ainoastaan kuvina.

Tulevaisuudessa taulukkoa voi laajentaa laskemaan monimutkaisempien paaluryhmien paalukuormia ja esimerkiksi paalujen päällä olevien anturoiden raudoitukset.

Avainsanat	paaluperustus, paaluperustusten suunnittelu, pystysuora paaluryhmä
------------	--

Tampere University of Applied Sciences
Department of Construction Technology
Building construction

Writer	Heidi Silvennoinen
Thesis	The pile load calculation of a vertical pile group
Pages	41 pages
Graduation time	02/2012
Thesis Supervisor	Tech. Lis. Olli Saarinen
Co-operating Company	Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen, RI Jukka Ukko

ABSTARCT

Sometimes building is founded on a ground that is unsuitable for a discreet foundation. Using the pile foundation the loads of the overhead constructions can be moved either to the solid or surrounding ground.

When designing a pile foundation, it must be followed certain directives and regulations. The maximum load of a single pile can be defined. It depends on the properties of the pile as well as the course of action.

For example, in an apartment house there can be hundreds of piles. It is very time-consuming to calculate the pile load of every pile one by one. Moreover, in the building site mistakes in a pile driving are very common and the pile loads are often recalculated.

The client of the work wanted a spreadsheet that calculates the pile load of a single pile which is located on a vertical pile group. The purpose was to make a simple and clear spreadsheet which includes the plan and the elevation. The goal was to make a spreadsheet that would accelerate the designing and on the other hand decrease the mistakes on the calculation work.

The spreadsheet was made by an Excel-program and it turn out to be the way the client wanted it.

In the future, the spreadsheet can be extended to calculate the complex pile groups.

Keywords

pile foundation, pile foundation design, vertical pile group

Alkusanat

Kiitos työnantajalleni ja työn tilaajalle, Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen Oy:lle, mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta. Opinnäytetyön tekeminen varsinaisen ansiotyön ohella on ollut erittäin haastavaa. Olen kuitenkin oppinut minulle vieraasta osa-alueesta, paalutuksesta, paljon opinnäytetyön tekemisen aikana ja uskon, että näistä tiedoista on minulle hyötyä rakennesuunnittelijan työssä.

Kiitos myös opinnäytetyön ohjaajille Jukka Ukolle ja Olli Saariselle, jotka auttoivat minua saamaan työn valmiiksi. Erityiskiitokset Heikille.

Espoossa helmikuussa 2012

Heidi Silvennoinen

Sisällysluettelo

1	Johdanto	7
2	Perustaminen paalujen varaan	8
2.1	Paaluperustuksen rakennesuunnittelu	8
2.2	Paaluperustuksen rakenteellinen mitoitus	9
3	Pohjarakennussuunnittelu	11
3.1	Pohjatutkimusten kulku ja tavoitteet.....	11
3.2	Pohjatutkimusten tulokset ja asiakirjat.....	11
4	Paalumateriaalit	13
4.1	Puupaalut.....	13
4.2	Teräspaalut	13
4.3	Teräsbetonipaalut.....	13
5	Paalutyypit.....	15
5.1	Tukipaalut	15
5.2	Kitkapaalut	16
5.3	Koheesiopaalut	16
5.4	Vetopaalut	16
6	Paalutusluokat.....	18
6.1	Paalutusluokka III.....	18
6.2	Paalutusluokka II	19
6.3	Paalutusluokka I	19
6.4	Paalutusluokka IB.....	19
6.5	Paalutusluokka IA.....	19
7	Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset	21
7.1	Pystykuormitus	21
7.2	Vaakakuormitus ja momenttikuormitus	22
7.3	Sivukuormitus ja sivuvastus	22
7.4	Negatiivinen vaippahankaus.....	22
8	Paalukuormien laskeminen	24
8.1	Pystysuora paaluryhmä	24
8.2	Vinopaaluryhmä	27
9	Paalujen sijoitus.....	29
10	Paalutustyö.....	31

11	Paaluanturat	32
12	Laskentataulukko	33
12.1	Lähtötiedot	33
12.2	Laskut.....	38
12.3	Kuvan piirto.....	38
12.4	Ohjeet.....	39
13	Loppusanat.....	40
	Lähteet.....	41

1 Johdanto

Insinööritoimisto Ylimäki & Tinkanen Oy:llä on pitkä ja laaja kokemus rakennesuunnittelusta niin asuinrakentamisessa kuin liike-, toimitila- ja teollisuusrakentamisessa. Nykyään monet erilaiset rakennuskohteet perustetaan paalujen varaan. Paaluperustuksen suunnittelu on rakennesuunnittelijan tehtävä. Se tehdään geoteknisten suunnitelmien pohjalta.

Paaluperustuksen suunnittelun eräänä keskeisenä tekijänä on yksittäiselle paalulle tuleva paalukuorma. Paalulle on määrätty suurin sallittu puristusjännitys, joka tarkoittaa paalun kapasiteettia ottaa vastaan sille tulevia kuormituksia. Työn tilaaja toivoi laskentataulukkoa, joka laskee paaluryhmän yksittäiselle paalulle paalukuorman, kun paaluryhmälle tulevat kuormitukset ovat tiedossa. Lisäksi taulukon tulee sisältää tasokuva paaluryhmästä ja leikkaukset, jotka muuttuvat lähtötietojen muuttuessa.

Opinnäytetyössä käydään läpi laskentataulukon tekovaiheita sekä yleisesti paaluperustusten suunnittelua pohjatutkimuksesta paalutustyöhön rakennesuunnittelijan näkökulmasta.

2 Perustaminen paalujen varaan

Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n julkaisussa RIL 121-2004

Pohjarakennusohjeet on paaluperustuksille määritelty yleisvaatimukset:

Jos rakennuksen tai rakenteen perustaminen maan varaan ei perustusten kuormitusten aiheuttamien painumien, siirtymien tai kiertymien suuruuden, maapohjan murtumisen tai riittämättömän vakavuuden tai jonkin muun syyn, kuten ympäristössä olevien rakennusten tai rakenteiden sijainnin tai perustustapojen takia ole mahdollista tai kohtuullista, rakennus on perustettava paaluilla syvemmällä olevalle kantavalle maakerrokselle tai kalliolle.

Tiheästi asutetuilla alueilla on otettu käyttöön maa-alueita, joissa paaluperustus on ainoa mahdollinen perustamistapa. Joskus paaluperustus voidaan valita perustamistavaksi myös hankkeen kokonaistalouden takia.

Paaluja voidaan jaotella monella eri tavalla. Asennustavan perusteella paalut jaetaan maata syrjäyttämättömiin ja maata syrjäyttäviin paaluihin. Maata syrjäyttämättömiä paaluja ovat muun muassa useimmat porapaalut ja kaivinpaalut. Maata syrjäyttäviä ovat esimerkiksi alapäästään suljetut teräsputket, maahan lyötyyn putkeen valetut paalut sekä tavanomaiset lyöntipaalut, johon tässä opinnäytetyössä pääasiassa keskitytään. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.) Lyöntipaaluja suunniteltaessa noudatetaan Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry:n ohjetta RIL 223–2005 Lyöntipaalutusohje LPO-2005.

2.1 Paaluperustuksen rakennesuunnittelu

Paaluperustus suunnitellaan aina kokonaisuutena perustettavien rakenteiden kanssa. Näin saadaan koko rakenteelle edullinen perustuksen muoto, mitat ja jäykkyys. Paaluperustuksen rakennesuunnitelmiin kuuluvat paalujen sijaintipiirustukset, paaluperustuspiirustukset ja rakenteelliset mitoituslaskelmat. Mitoituslaskelmat on aina dokumentoitava. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

2.2 Paaluperustuksen rakenteellinen mitoitus

Paaluperustuksen rakenteelliseen suunnitteluun kuuluvat

- mitoitus
- kantavuustarkastelu
- vakavuustarkastelu
- siirtymätarkastelu.

Kantavuustarkastelu käsittää paalun kuormien laskemisen eri suunnittelukuormista. Tuloksia verrataan sallittuihin arvoihin kaikissa kuormitustilanteissa. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Vakavuustarkasteluun kuuluu kriittisten kuormien laskeminen sekä yksittäisen paalun että koko paaluperustuksen osalta. Vakavuustarkastelu on suoritettava etenkin silloin, kun pitkät paalut sijaitsevat hyvin pehmeässä maassa, vedessä tai ilmassa, eli niiden sivutuenta on riittämätön. Yksittäisen paalun kriittinen kuorma määräytyy tällöin usein paalun nurjahduskuorman mukaan. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Siirtymätarkasteluun sisältyy tukipaalujen osalta eri kuormitusten aiheuttamat perustuksen siirtymät. Kitka- ja koheesiopaaluille perustuksen siirtymää voi aiheuttaa paaluja kantavan perusmaan ajan myötä tapahtuvat muutokset. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Teräsbetonipaaluperustukset on pyrittävä suunnittelemaan niin, että paaluille kohdistuu ainoastaan puristavia normaalivoimia. Tällöin paalun halkeamaleveyttä ei tarvitse määrittää. Jos paaluperustukset ottavat vastaan taivutus- tai vetorasituksia, paalun halkeilu on tarkastettava. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Paaluperustusta suunniteltaessa on otettava huomioon myös paalutustyön epätarkkuuden aikaansaamat poikkeamat paalujen sijainnissa ja kaltevuuksissa. Rakenteellinen mitoitus on tehtävä niin, että paaluperustus kestää, vaikka paalujen

sijaintipoikkeamat vaikuttavat paalujen kuormiin ja perustuksen rasitukseen. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

3 Pohjarakennussuunnittelu

Ennen rakennuksen perustustavan valintaa on rakennuspaikalla tehtävä pohjatutkimuksia. Pohjatutkimusten avulla selvitetään rakennuspaikan maa- ja kallioperän ominaisuuksia ja rakennetta. Vaativissa ja hyvin vaativissa pohjarakennuskohteissa, joihin asuinkerrostalot kuuluvat, pohjatutkimuksen tekee geotekninen suunnittelija yhteistyössä rakennesuunnittelijan kanssa. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

3.1 Pohjatutkimusten kulku ja tavoitteet

Pohjatutkimusten tavoitteena on löytää rakennuskohteelle riittävän varma ja taloudellinen perustusratkaisu. Vaativissa kohteissa on tärkeää, että pohjarakennussuunnittelu aloitetaan hyvissä ajoin, jo rakennushankkeen hankesuunnitteluvaiheessa. Riittävän yksityiskohtaiset pohjatutkimukset vähentävät työnaikaisia ongelmia ja varmistavat aikataulussa ja budjetissa pysymistä. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

Pohjatutkimukset aloitetaan yleensä maastokatselmuksella. Maastokatselmuksella saadaan selville pääpiirteittäin, minkälainen maaperä rakennuspaikalla on. Samalla voidaan kaivaa koekuoppia, joista voidaan saada tietoa muun muassa erilaisista maakerroksista, maan lohkaraisuudesta, pohjaveden korkeustasosta ja maan kaivuominaisuuksista. Tarkempia tutkimustuloksia saadaan erilaisilla kairauksilla ja laboratoriokokein rakennuspaikalta otetuista näytteistä. (Jääskeläinen, 2009.)

3.2 Pohjatutkimusten tulokset ja asiakirjat

Pohjatutkimusten perusteella geotekninen suunnittelija tekee pohjatutkimusraportin ja perustamistapalausunnon. Paaluperustusten suunnittelun kannalta oleellisin raportissa oleva asia on perustamistapa, jota geotekninen suunnittelija suosittelee tekemiensä tutkimusten perusteella. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

Geotekninen suunnittelija ehdottaa tietyn tyyppisen ja kokoisen paalun käyttöä, jonka perusteella rakennesuunnittelija alkaa suunnitella paaluperustusta.

Perustamistapalausunnosta selviävät perustamistasot, geotekniset kantavuudet ja paalujen sallittu kuorma. Pohjavesipinta ja sen vaihteluväli ovat myös paalujen suunnittelun kannalta tärkeää tietoa. Raportista selviää myös routasuojauksen ja salaojituksen tarve sekä kaivantojen tekotapa ja niiden työnaikainen kuivana pito. (Jääskeläinen, 2009.)

4 Paalumateriaalit

Paaluja voidaan valmistaa puusta, teräksestä ja teräsbetonista. Jokaiselle materiaalille on erilaisia käyttövaatimuksia. Tässä työssä keskitytään teräsbetonipaaluihin, joita yleisimmin käytetään tavanomaisissa talonrakennushankkeissa.

4.1 Puupaalut

Puupaalut ovat suorakasvuisia mänty- ja kuusirunkoja, ja ne kuoritaan paalutyypin mukaan joko osittain tai täysin. Puupaaluja käytettäessä paalun on sijoitettava kokonaan pohjaveden alapuolelle. Puupaalujen yläpää on lahosuojattava, sillä pohjavedenpinta voi alentua. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Puupaalujen kärki vahvistetaan teräsrenkaalla, jos paalu toimii tukipaaluna tai jos paalu täytyy asentaa vaikeasti läpäistäviin maakerroksiin. Asennettaessa puupaaluja löyhiin, kivettömiin kitkamaakerroksiin ja koheesiomaakerroksiin riittää puupaalun kärjen reunojen viistäminen tai kärjen pyöristäminen. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

4.2 Teräspaalut

Teräspaaluina käytetään erilaisia teräsprofiileja, esimerkiksi muototeräksestä koottuja putkimaisia teräsprofiileja ja erilaisia valssattuja profiileja. Teräspaaluja käytettäessä täytyy suunnittelussa kiinnittää erityistä huomiota korroosioon. Tämän takia teräspaalut usein ylimitoitetaan korroosion varalle. Teräspaaluissa on tavallisesti vahvistettu kärkekappale tai kallioon tukeutuessaan kalliokärki. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

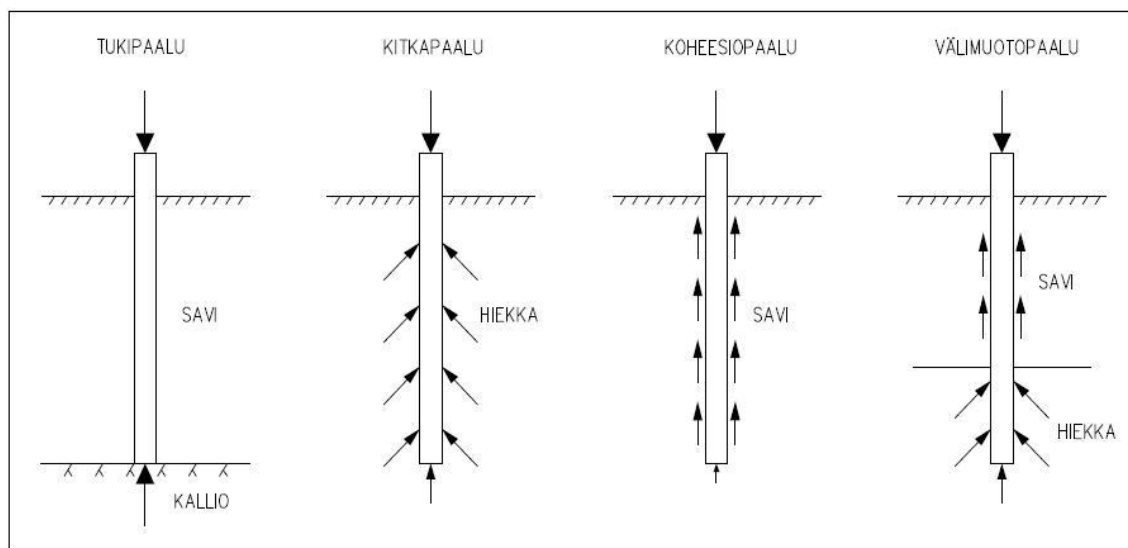
4.3 Teräsbetonipaalut

Teräsbetonipaalut ovat nykyisin suurimmalta osin tehdasvalmisteisia ja ne on mitoitettu nostolle, kuljetukselle ja lyöntirasituksille. Jos paaluun kohdistuu taivutusta, leikkausta tai vääntöä, ne on mitoitettava näiden rasitusten osalta betonirakenteita koskevien ohjeiden mukaan. Tehdasvalmisteisten paalujen yleisimmät koot ovat $250 \times 250 \text{ mm}^2$, $300 \times 300 \text{ mm}^2$ ja $350 \times 350 \text{ mm}^2$. Tällä hetkellä käytetyin paalukoko on 300×300

mm² vaikka aikaisemmin 250 x 250 mm² paalut olivat yleisimpiä. Suuntaus paalujen koossa on ylöspäin. Lyöntipaalutusohjeessa LPO-2005 käsitellään vähintään 250 x 250 mm²:n ja enintään 350 x 350 mm²:n teräsbetonisia lyöntipaaluja. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

5 Paalutyypit

Paalut jaetaan toiminnallisuuden mukaan kolmeen eri tyyppiin, tukipaaluihin, kitkapaaluihin ja koheesiopaaluihin. Paalu voi olla myös välimuotopaalu, jolloin sen toiminta jakautuu.



Kuva 1: Paalutyypit (Jääskeläinen, 2009.)

5.1 Tukipaalut

Paaluperustusta suunniteltaessa tulisi ensisijaisesti selvittää tukipaalujen käyttömahdollisuus. Tällöin pohjatutkimuksilla selvitetään pohjakerrosten pääpiirteittäinen rakenne ja tutkitaan myös läpäistävien maakerrosten koostumus. Pohjatutkimus on suoritettava erityisen tarkasti, jos kallion pinta on viettävä ja sen päällä oleva karkearakeinen tai moreenimaakerros on ohut tai viettävän kalliopinnan päällä oleva kitkamaakerros on löyhä. Kallion pinnan sijainti ja muodot on tutkittava huolella myös silloin, kun hienorakeiset tai eloperäiset maakerrokset ulottuvat kallion pintaan asti. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Tukipaalujen käytön edellytyksenä on, että paalut ulottuvat kallioon tai tiiviisiin maakerroksiin niin, että pääosa kuormista siirtyy kärjen välityksellä kallioon tai maakerroksiin. Kärkivastuksen täytyy vastata laskettua kantavuutta. Käytännössä kärkivastus saadaan selville paalujen loppulyönnissä syntyvän painuman perusteella.

Maakerrosten ympäröimissä puu- ja teräsbetonipaaluissa ei yleensä tarvitse ottaa huomioon paalun nurjahtamista. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

5.2 Kitkapaalut

Kitkapaaluja käytettäessä on tutkittava maakerrosten väliset rajat sekä selvitettävä maakerrosten rakeisuus ja rakenteellinen tiiviys. Maakerrosten ominaisuudet on erityisesti tutkittava toimivaksi suunnitellun alueen osalta. Kitkapaalun kantavuus muodostuu paalun vaippaan kohdistuvasta kitkasta ja paalun kärkivastuksesta. Kantavuuteen vaikuttavat oleellisesti kantavan maakerroksen tiiviys ja paalun maakerroksessa olevan osan pituus ja muoto. Myös paaluryhmän koolla on merkitystä, sillä usean paalun ollessa vierekkäin, maa-aines niiden ympärillä tiivistyy ja lujittuu. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

5.3 Koheesiopaalut

Koheesiopaaluja käytettäessä selvitetään erityisesti pehmeiden maakerrosten lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet. Koheesiopaalujen kantavuus perustuu miltei yksinomaan paalun vaippapinnan ja sitä ympäröivän maan väliseen tartuntajännitykseen. Tartuntajännitys on maksimissaan ympäröivän maan suljetun leikkauslujuuden suuruinen. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Koheesiopaalut ovat yleensä alaspäin suippenevia, jatkamattomia ja puhtaaksi kuorittuja puupaaluja. Teräs- ja teräsbetonipaaluja käytetään yleensä koheesiopaaluina vain erikoistapauksissa ja erityisselvitysten työn jälkeen. Koheesiopaalun kantavuus perustuu melkein ainoastaan paalun vaippapinnan ja sitä ympäröivän maan väliseen tartuntajännitykseen. Tämän tartuntajännityksen oletetaan olevan enimmillään ympäröivän maan leikkauslujuuden suuruinen. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

5.4 Vetopaalut

Mikäli paaluun kohdistuu tavallisissa kuormitustapauksissa vetoa enemmän kuin paalun tehollisen painon verran, tulee vetopaalun sallittu kuorma määrittää paalun ja maan

väliseen kitka – ja koheesiovoimaan kohdistuvan geoteknisen selvityksen perusteella ja paalun rakenteellisen mitoituksen pohjalta. Vetopaaluja tulisi kuitenkin yrittää kaikin tavoin välttää eikä paaluille tulisi sallia vetoa enempää kuin paalun oman painon verran. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

6 Paalutusluokat

Paalutustyöt jaetaan paalutusluokkiin III, II ja I, joista I jaetaan vielä kahteen eri luokkaan; IA ja IB. Paalutustyön luokka määräytyy rakennuskohteen luonteen, pohjatutkimusten seikkaperäisyyden, paalujen laadun, paalutuskaluston ja paalutustöiden suorituksen sekä valvonnan ja siihen liittyvien tarkastustoimenpiteiden laadun ja seikkaperäisyyden perusteella. Asuinrakennusten suunnittelussa kohteet kuuluvat yleensä paalutusluokkaan IB tai II. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Paalutusluokka määrää tukipaalun geoteknisen kantavuuden mitoituksessa käytettävän suurimman keskeisen puristusjännityksen. Alla olevasta taulukosta selviää eri paalutyypeille paalutusluokissa sallitut puristusjännitykset (MN/m^2).

Taulukko 1: Sallitut puristusjännitykset (MN/m^2) eri paalutyypeillä eri paalutusluokissa. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Paalutyyppi	Paalutusluokka			
	IA	IB	II	III
Puupaalut	-	-	-	≤ 5
Teräsbetonipaalut	≤ 9	≤ 9	≤ 7	≤ 5
Teräspaalut	≤ 100	≤ 100	≤ 70	≤ 40

6.1 Paalutusluokka III

Paalutusluokka III on käytössä yleensä pienissä paalutuskohteissa, jolloin paaluille tulevat kuormat ovat pieniä ja jolloin paalutustyön suoritus ei täytä paalutusluokan II vaatimuksia.

Lyöntipaalutusohjeessa on annettu paalutusluokan III paalutustöille ohjeita. Käytettävien teräsbetonipaalujen on täytettävä LPO-2005:ssä esitetyt laatu- ja rakennevaatimukset ja niiden betonin nimellislujuus on oltava vähintään K45, eurokoodissa C35/45.

6.2 Paalutusluokka II

Paalutusluokalle II on asetettu seuraavia vaatimuksia paalutusluokan III vaatimusten lisäksi:

- pohjatutkimus on riittävän yksityiskohtainen ja luotettava
- apupaalua voi käyttää vain, jos se on suunnitelmissa etukäteen esitetty
- paalutustyö suoritetaan tarkasti Lyöntipaalutusohjeiden mukaisesti
- paalutuspöytäkirjasta on pystyttävä arvioimaan jokaisen yksittäisen paalun ehjänä säilyminen ja kantavuus
- kallioon tai lohkareiseen maahan ulottuvat paalut varustetaan kalliokärjellä.
(RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

6.3 Paalutusluokka I

Paalutusluokka I jaetaan alaryhmiin IB ja IA. Eroavaisuudet alaryhmien välille tulevat paalujen geoteknisestä kantavuudesta ja paalutuksen tarkastustoimenpiteistä.

6.4 Paalutusluokka IB

- betonin nimellislujuus on oltava vähintään K50 (eurokoodi C40/50)
- paalun pää on vahvistettava teräsvanteella
- paalutustyössä käytettävä järkäle on hydraulisesti toimiva
- apupaalun toimivuus varmistetaan PDA-mittauksella
- valvontatoimenpiteet ovat LPO-2005:n mukaiset
- jokaisen yksittäisen paalun, pienen paaluryhmän jokaisen paalun ja suuren paaluryhmän joka viidennen paalun lyönnistä pidetään täydellistä pöytäkirjaa
- loppulyöntiehto tarkistetaan PDA-mittauksilla. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

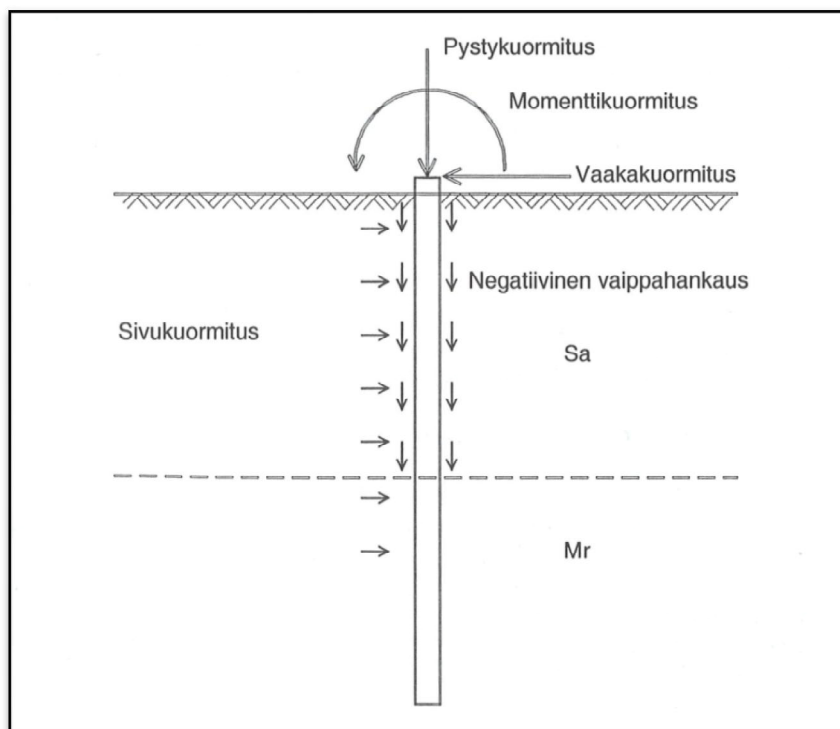
6.5 Paalutusluokka IA

Paalutusluokassa IA paalutukselle asetetaan vaatimukset tapauskohtaisesti. Vaatimukset ovat suuremmat kuin luokassa IB. Suunniteltaessa paalutusluokkaan IA, sekä

pohjarakenteiden vastaavalla suunnittelijalla, että geoteknisellä suunnittelijalla tulee olla AA-luokan pätevyys. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

7 Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset

Paaluun vaikuttavia ulkoisia kuormia ovat pystykuormitus, momenttikuormitus, vaakakuormitus, sivukuormitus ja negatiivinen vaippahankaus. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)



Kuva 2: Paaluun vaikuttavat ulkoiset kuormitukset (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

7.1 Pystykuormitus

Yläpuolisista kantavista rakenteista tulevat pysyvät pystykuormitukset pystytään siirtämään paalun välityksellä karkearakeisiin maakerrokseen, moreenikerrokseen tai kalliolle. Hetkellisiä pystykuormituksia voidaan siirtää myös muihin maakerrokseen. Paalu ja paaluryhmä tulee suunnitella niin, että paaluille aiheutuvat taivutusrasitukset pysyvät mahdollisimman pieninä. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

7.2 Vaakakuormitus ja momenttikuormitus

Teräsbetoniset lyöntipaalut ottavat vastaan vaaka- ja momenttikuormitusta vain vähäisen määrän. Ne aiheuttavat paaluille taivutusrasituksia jakautuessaan maakerrokseen. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

7.3 Sivukuormitus ja sivuvastus

Paalu saa sivukuormitusta esimerkiksi toispuoleisesta maatyöstä, ulkopuolisista pakkovoimista tai maanpaineesta. Nämä aiheuttavat paaluun taivutusta. Sivuvastuksesta puhutaan, kun paalu siirtyy maata vasten. Paalulle voi sallia pieniä ulkoisia sivusuuntaisia pakkovoimia maasta sivuvastuksen avulla. Tällöin paalu mitoitetaan taivutukselle. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

7.4 Negatiivinen vaippahankaus

Paaluun syntyy lisäkuormaa, kun paalun ympärillä oleva maa painuu enemmän kuin paalu ja jää riippumaan paalun varaan. Tällöin osa maan painosta siirtyy paalujen kannateltavaksi. Tätä ilmiötä kutsutaan negatiiviseksi vaippahankaukseksi. Tyypillisesti negatiivista vaippahankausta esiintyy savikerrosten läpi lyödyssä tukipaalussa, kun paalun ympärillä oleva savikerros puristuu kokoon pystysuunnassa pohjaveden alentumisen tai täyttemaakerroksen aiheuttaman kuormituslisäyksen takia. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Yleensä negatiivinen vaippahankaus vaikuttaa paalun mitoituksessa samaan aikaan paalun pysyvän kuorman kanssa. Jos paalun lyhytaikainen kuorma on suurempi kuin kaksi kertaa negatiivinen vaippahankaus, on paalukuormaan otettava huomioon pysyvän kuorman ja negatiivisen vaippahankauksen lisäksi lyhytaikainen kuorma. Negatiivisesta vaippahankauksesta aiheutuva kokonaislisäkuorma voidaan laskea tiheille ja suurille paaluryhmille edellä olevien kaavojen 1 ja 2 sekä kuvan 3 perusteella. Paaluryhmää mitoittaessa käytetään pienempää saaduista arvoista. Yksittäiselle paalulle tuleva lisäkuorma saadaan jakamalla P_{neg} paalujen lukumäärällä. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

Paaluryhmissä kokonaislisäkuormaan vaikuttavat paalujen keskiöetäisyydet ja paalujen lukumäärä. Negatiivisen vaippahankauksen oletetaan ulottuvan syvyyteen, jossa paalujen ympärillä olevan maan painuma on 5 mm suurempi kuin paalun painuma.

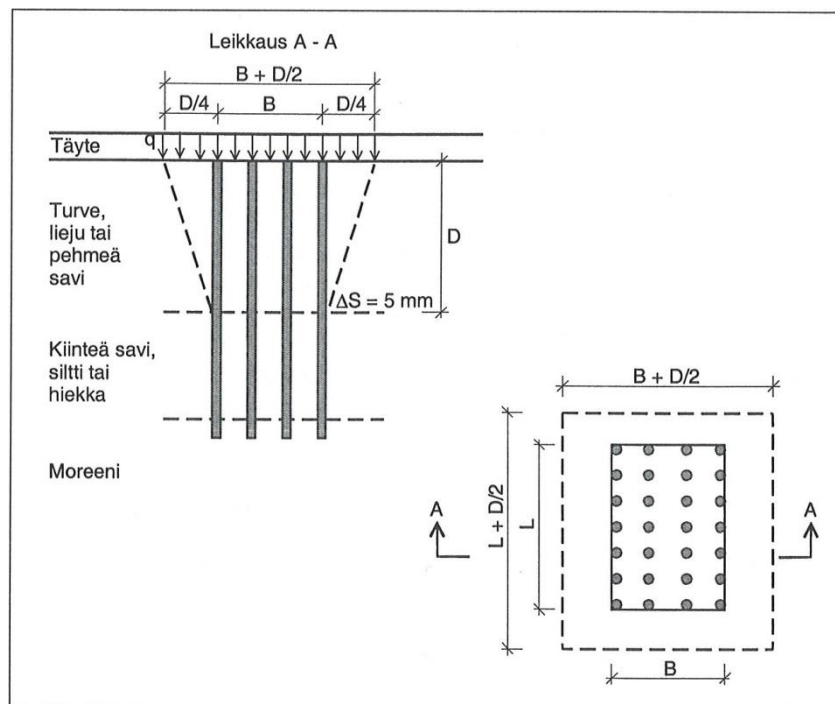
$$P_{neg} = \frac{B \cdot L \cdot q + 2 \cdot (B + L) \cdot D \cdot s_u}{n} \quad (1)$$

tai

$$P_{neg} = \frac{(B + \frac{D}{2}) \cdot (L + \frac{D}{2}) \cdot q}{n} \quad (2)$$

s_u = suljettu leikkauslujuus

n = paalujen lukumäärä (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)



Kuva 3: Negatiivisen vaippahankauksen aiheuttaman kokonaislisäkuorman laskeminen paaluryhmälle. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

8 Paalukuormien laskeminen

Jos paaluille tulevat sivuttaissuuntaiset kuormat ovat pieniä, voidaan paalutus suunnitella toteutettavaksi ainoastaan pystysuoria paaluja käyttäen. Pystysuorat paalut ottavat vastaan ainoastaan pystysuoraa kuormitusta sekä taivutusmomenttia. Mahdolliset vaakavoimat johdetaan maahan muilla tavoin, esimerkiksi paalujen sivuttaisvastusten ja muiden rakenteiden kautta. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Jos perustuksiin kohdistuu huomattavia vaakavoimia, on paaluperustus suunniteltava siirtämään maahan myös vaakasuuntaisia voimia. Tällöin käytetään vinopaaluryhmiä, joissa paaluja on vähintään kahteen eri suuntaan. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Rakenteiden pysyvät ja muuttuvat kuormat siirtyvät ylhäältä alas kantavia rakenteita pitkin aina paaluanturoiden kautta paaluille. Paaluryhmälle tulevat kuormat yhdistetään yhdeksi paaluryhmään vaikuttavaksi voimaksi eli kuormitusresultantiksi.

8.1 Pystysuora paaluryhmä

Ideaalitilanteessa kuormitusresultantti V vaikuttaa paaluryhmään keskeisesti, jolloin kimmainen kokoonpuristuma on paaluilla yhtä suuri. Jos paalut ovat samanlaisia, on paalujen jäykkyys EA/L vakio. Tällöin saman kimmoisen muodonmuutoksen ΔL syntymiseen tarvittavat paalukuormat $P=EA \cdot \Delta L/L$ ovat yhtä suuria. Näin ollen paaluperustuksen kuormitusresultantti jakautuu tasan paaluryhmän paaluille, eli jokainen paalu ottaa kuormaa vastaan saman verran. Yhden paalun paalukuorma on laskettavissa kaavasta

$$P = \frac{V}{n} \quad (3)$$

missä

P = paaluryhmän yhden paalun paalukuorma

V = paaluryhmän keskeinen pystysuora kuormitusresultantti

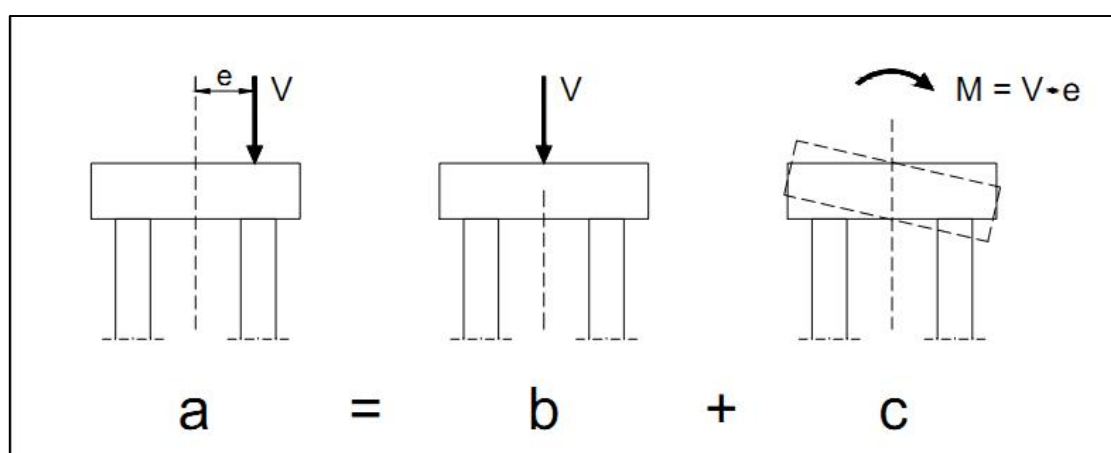
n = paaluryhmän paalujen lukumäärä (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Usein kuormitusresultantti on kuitenkin epäkeskeinen paaluryhmän painopisteakselin suhteen. Epäkeskeinen kuormitusresultantti jakautuu paaluille epätasaisesti, jolloin paaluryhmän yksittäisten paalujen paalukuormat poikkeavat toisistaan.

Kun kuormitusresultantti on epäkeskeinen, se synnyttää paaluryhmään momenttia.

Momentti pyrkii kääntämään paaluryhmää. Kuormitusresultantin suuruudesta ja epäkeskisyydestä riippuen paaluihin voi syntyä huomattavia puristus- tai vetorasituksia.

Alla olevassa kuvassa on esitetty havainnollisesti, miten epäkeskeinen kuormitusresultantti vaikuttaa paaluryhmään. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)



Kuva 4: Pystysuoran paaluryhmän epäkeskeinen kuormitus (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Kuvassa epäkeskeinen kuormitusresultantti V voidaan statiikan oppien mukaisesti siirtää vaikuttamaan paaluryhmään keskeisesti, kun lisätään momentti M , jonka suuruuteen vaikuttavat kuormitusresultantti V ja sen etäisyys e paaluryhmän painopisteakselista. Näin syntyy kaksi kuormitustapausta: tapaus (b) ja tapaus (c), joiden avulla voidaan laskea pystysuoran paaluryhmän yhden paalun paalukuorma. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Kuormitustapauksista ensimmäinen on keskeisen kuormitusresultantin aiheuttama paalukuorma, joka lasketaan kaavalla (3). Toinen kuormitustapaus on momentin aiheuttama paalukuorma, joka muodostuu momentista M ja paalujen etäisyyksistä painopisteakselista (r). (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Nämä kaksi kuormitustapausta yhdistämällä saadaan yksittäisen paalun paalukuormalle kaava

$$P = \frac{V}{n} + \frac{V \cdot e_x \cdot r_x}{\sum r_{ix}^2} + \frac{V \cdot e_z \cdot r_z}{\sum r_{iz}^2} \quad (4)$$

missä

P = paaluryhmän yhden paalun paalukuorma

V = paaluryhmän keskeinen pystysuora kuormitusresultantti

n = paaluryhmän paalujen lukumäärä

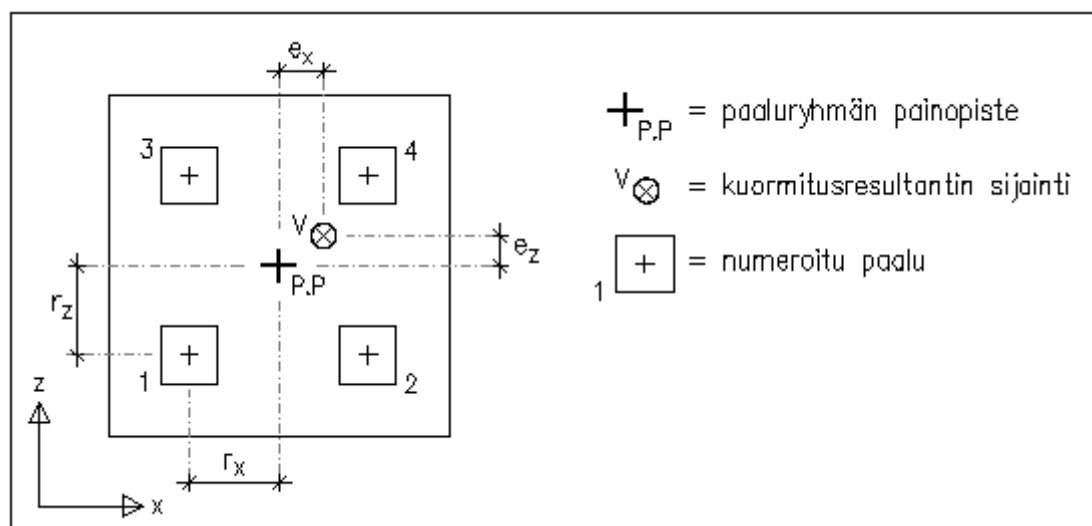
e_x = V :n epäkeskeisyys x-akselin suunnassa

e_z = V :n epäkeskeisyys z-akselin suunnassa

r_x = paalun etäisyys painopisteakselista x-akselin suunnassa

r_z = paalun etäisyys painopisteakselista z-akselin suunnassa (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

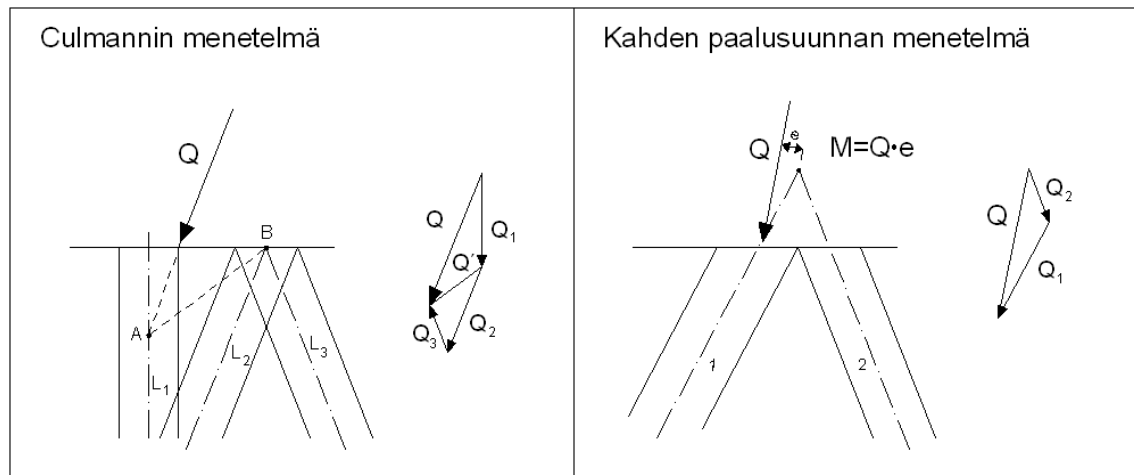
Kuvassa 5 on havainnollistettu yllä olevaa kaavaa.



Kuva 5: Pystysuoran paaluryhmän paalukuormien laskeminen

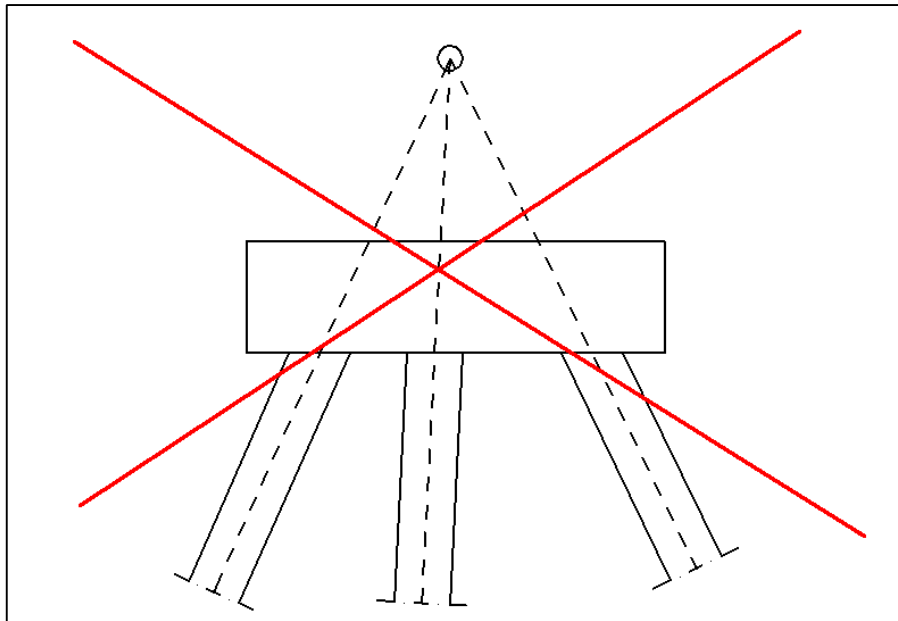
8.2 Vinopaaluryhmä

Jos paaluryhmälle tuleva kuormitusresultantti on vino ja sen suunta vaihtelee eri kuormitustapausten välillä, on paaluryhmässä käytettävä vähintään kahteen eri suuntaan olevia paaluja. Vinopaaluilla paalukuormien alustavaan ja likimääräiseen tarkasteluun sopivat yksinkertaiset graafiset menetelmät. Kahden paalusuunnan tapauksessa paalukuormien likimääräinen määrittäminen onnistuu kuormitusresultantin jakamisella komponentteihin. Kolmen paalusuunnan tapauksessa voidaan käyttää Culmannin menetelmää, jonka periaatteet selviävät kuvasta 6. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)



Kuva 6: Eri menetelmiä vinojen paalujen paalukuormien laskemiseen. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Jos kaikki paalurivit ovat erisuuntaisia, niiden painopisteakseliin jatkeet eivät saa kohdata toisiaan samassa pisteessä, kuten kuvassa 7 tapahtuu. Tällainen paaluryhmä menettää kyvyn ottaa vastaan momenttia. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)



Kuva 7: Erisuuntaisten paalujen sopimaton sijoittelu.

9 Paalujen sijoitus

Paalut tulisi saada lyötyä tarkalleen suunniteltuun paikka ja asentoon. Toisiaan liian lähellä olevat paalut voivat aiheuttaa kitka- ja koheesiomaassa paalujen kantavuuden heikkenemistä tai paalut voivat vahingoittua maahanlyönnin aikana. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Lyöntipaalutusohjeessa LPO-2005 on määritelty yhdensuuntaisten paalujen keskiöetäisyyksille minimiarvot; tuki- ja kitkapaaluille 0,8 metriä ja koheesiopaaluille 1,0 metriä. Yhdensuuntaisten paalujen keskiöetäisyyksien tulee edellä mainittujen minimiarvojen lisäksi noudattaa taulukon 2 vähimmäisarvoja, jotka määräytyvät paalun toimintatavan ja pituuden mukaan.

Taulukko 2: Paalujen keskiöetäisyyden vähimmäisarvot katkaisutasossa (d = pyöreän paalun halkaisija tai neliömäisen paalun sivumitta). (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Paalun pituus (m)	Tuki- ja kitkapaalu		Koheesiopaalu	
	Pyöreä	Neliömäinen	Pyöreä	Neliömäinen
10	2,7 d	3 d	4 d	4,5 d
10–25	(väliarvot interpoloidaan)		5 d	5,6 d
25	3,5 d	4 d	6 d	6,8 d

Usein paalujen sijainti, asento ja suunta poikkeavat suunnitelmista pohjaolosuhteiden ja mittaepätarkkuuksien vuoksi. Lyöntipaalutusohjeista löytyvät ohjearvot, kuinka paljon paalu tai paaluryhmä saa enintään poiketa teoreettisesta sijaintipaikastaan. Taulukosta 3 selviää suurimmat sallitut poikkeamat.

Taulukko 3: Paalujen sallitut sijaintipoikkeamat teoreettisesta sijaintipaikasta. (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

Paalun suurin sallittu sijaintipoikkeama (mm)	
Yksittäinen, paalulaatan tai paaluhatturakenteen paalu	100
Pienen paaluryhmän (4–8 paalua) yksittäinen paalu	150
Paaluanturan paalu	150; vaikeat pohjaolosuhteet 200
Paalurivin yksittäinen paalu	150

Lisäksi pienten ja suurien paaluryhmien sekä paalurivien painopisteen sijaintipoikkeama saa olla enintään 50 mm.

Myös asento- ja suuntapoikkeamille on asetettu suurimmat sallitut poikkeamat. Ne ovat:

- yksittäisellä paalulla $\pm 0,04$ (40mm/m)
- samansuuntaisten paalujen ryhmässä keskimäärin $\pm 0,02$ (20mm/m)
- kaltevien paalujen horisontaalisuunnassa 10° . (RIL Lyöntipaalutusohje, 2005.)

10 Paalutustyö

Lyöntipaalutusohjeessa LPO-2005 on määritelty tarkkoja määräyksiä ja ohjeita paalutustyölle. Paalutustyölle täytyy aina nimetä paalutustyönjohtaja, jonka pitää olla perehtynyt paalutustöihin ja jolla on laaja kokemus paalutustöistä.

Paalutustyönjohtajalla on oltava sijainen ja jommankumman on aina oltava työmaalla paikalla. Heidän tehtäviinsä kuuluu paalutustöiden johtaminen, paalutuspöytäkirjan pitäminen sekä tarkastus- ja valvontatoimenpiteet. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Kun paalutustyö on saatettu loppuun, suoritetaan paalujen mittaus, jolla selvitetään paalujen todelliset sijaintipoikkeamat. Mittaus suoritetaan siltä tasolta, mistä paalut on suunniteltu katkaistaviksi. Sijaintipoikkeamat määritetään x- ja y-koordinaatistossa. Myös paaluryhmien ja paalurivien painopisteiden kokonaispoikkeamat tulee selvittää. Rakennesuunnittelija tarkastaa, vaikuttavatko poikkeamat paaluihin ja yläpuolisiin rakenteisiin syntyviin rasituksiin. Jos sijaintipoikkeama ylittää sallitut rajat, on perustuksiin suunniteltava lisäpaaluja tai lisärakenteita, kuten sidepalkkeja. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

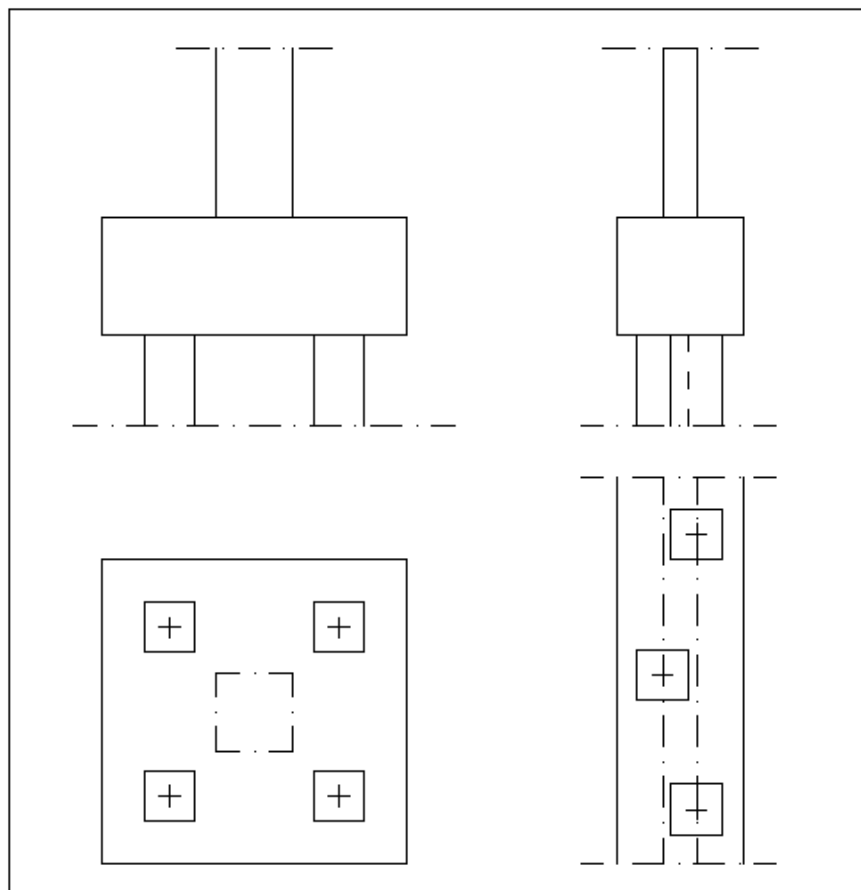
Paalut katkaistaan suunnitelmien mukaan sen jälkeen, kun suunnittelija on tarkastanut paalujen toiminnallisuuden ja antanut luvan katkaisuun. Yleensä paalut katkaistaan niin, että ne ulottuvat 50 mm paaluanturan sisään. (Jääskeläinen, 2009.)

11 Paaluanturat

Paaluanturan tehtävänä on välittää yläpuolisista rakenteista tulevat kuormat paaluille. Se myös yhdistää yläpuoliset rakenteet ja paalut toiminnallisesti ja sitoo paalut paaluryhmäksi. Paaluantura mitoitetaan rakenteellisesti jäykkänä pilarilaattana. (RIL Pohjarakennusohjeet, 2004.)

Paaluanturan alapinta sijoitetaan routimattomaan syvyyteen. Perustusten routimista voidaan myös routaeristyksellä tai tekemällä massanvaihto paaluanturan alle routimattomaan syvyyteen. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

Paaluanturan reuna on vähintään puolet paalun halkaisijasta uloimman paalun reunaan. Suunniteltaessa paaluanturoita on otettava huomioon sallitut mittapoikkeamat paalujen sijainnissa. Paalut ja paaluanturat voidaan sitoa ryhmiksi erilaisilla sijoitteluilla. Kuvassa 8 on annettu kaksi esimerkkiä erilaisesta paalujen sijoittelusta.



Kuva 8: Paalujen sijoitteluesimerkkejä. (Rantamäki & Tammirinne, 1979.)

12 Laskentataulukko

Laskentataulukon pohjana on sivulla 23 oleva kaava 4, joka laskee paaluryhmän yksittäiselle paalulle kuorman. Taulukkoon syötetään etukäteen laskettu kuormitusresultantti, ja taulukko laskee jokaiselle paaluryhmän paalulle paalukuorman. Koska taulukko käsittelee ainoastaan etukäteen laskettuja kuormia, käytettävällä suunnittelustandardilla ei ole merkitystä. Suunnittelustandardi valitaan kuormia alas tuotaessa.

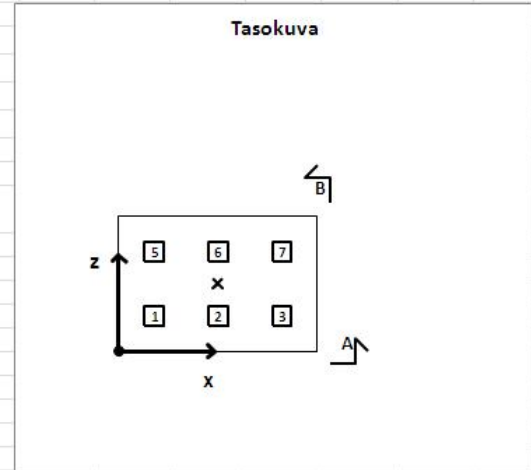
Laskentataulukossa on neljä välilehteä: Lähtötiedot, Laskut, Kuvan piirto ja Ohjeet.

12.1 Lähtötiedot

Lähtötiedot-välilehti on laskentataulukon etusivu, ja se on tehty taulukon jokapäiväistä ja nopeaa käyttöä ajatellen. Kun taulukon käyttöön on perehtynyt ja haluaa laskea nopeasti paaluryhmän paalukuormituksia, ei tarvitse käyttää muuta kuin ensimmäisenä olevaa välilehteä.

Yläreunassa on tila kohteen tietoja varten. Nämä tiedot, joita ovat esimerkiksi suunnittelija, päiväys ja työnumero, näkyvät ensimmäisen sivun tulosteessa. Taulukon etusivu on kuvan 9 mukainen.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	PAALUKUORMIEN LASKEMINEN			KOHDETIEDOT:			SUUN	HSIL		TYÖ NRO.		XXXXX		
2	PYSTYSUORA PAALURYHMÄ						TARK							
3							ULK. TARK.			PÄIVÄYS		9.6.2011		
4														
5	LÄHTÖTIEDOT:													
6														
7	Kuormitusresultantti $V=$				3000 kN									
8	Resultantin sijainti x-suunnassa, $X_v=$				2,000 m									
9	Resultantin sijainti z-suunnassa, $z_v=$				1,500 m									
10	Ulkoinen momentti $M_x=$				200 kNm									
11	Ulkoinen momentti $M_z=$				-200 kNm									
12	Paalun sivumitta =				300 mm									
13														
14	Paalut			x(m)	z(m)									
15	nro													
15	1	kyllä		1	1									
16	2	kyllä		2	1									
17	3	kyllä		3	1									
18	4	ei		4	1									
19	5	kyllä		1	2									
20	6	kyllä		2	2									
21	7	kyllä		3	2									
22	8	ei		4	2									
23	9	ei		1	3									
24	10	ei		2	3									
25	11	ei		3	3									
26	12	ei		4	3									
27														
28														
29														
30														
31														
	Lähtötiedot			Laskut			Kuvan piirto			Ohjeet				



Kuva 9: Excel-taulukon etusivu

Lähtötietoihin syötetään etukäteen laskettu kuormitusresultantti V ja sen sijainti tasokoordinaatistossa (x,z) metreinä sekä mahdolliset ulkoiset momentit M_x ja M_z .

Laskettavassa paaluryhmässä voi olla enintään 12 paalua. Paalu valitaan paaluryhmään kuuluvaksi yhdistelmäruudusta eli alasvetovalikosta, josta aukeavat vaihtoehdot ”kyllä” tai ”ei”. Paalujen sijainnit merkitään koordinaatistoon. Keltaisella pohjalla olevia soluja voi muokata, muut solut ovat lukittuina.

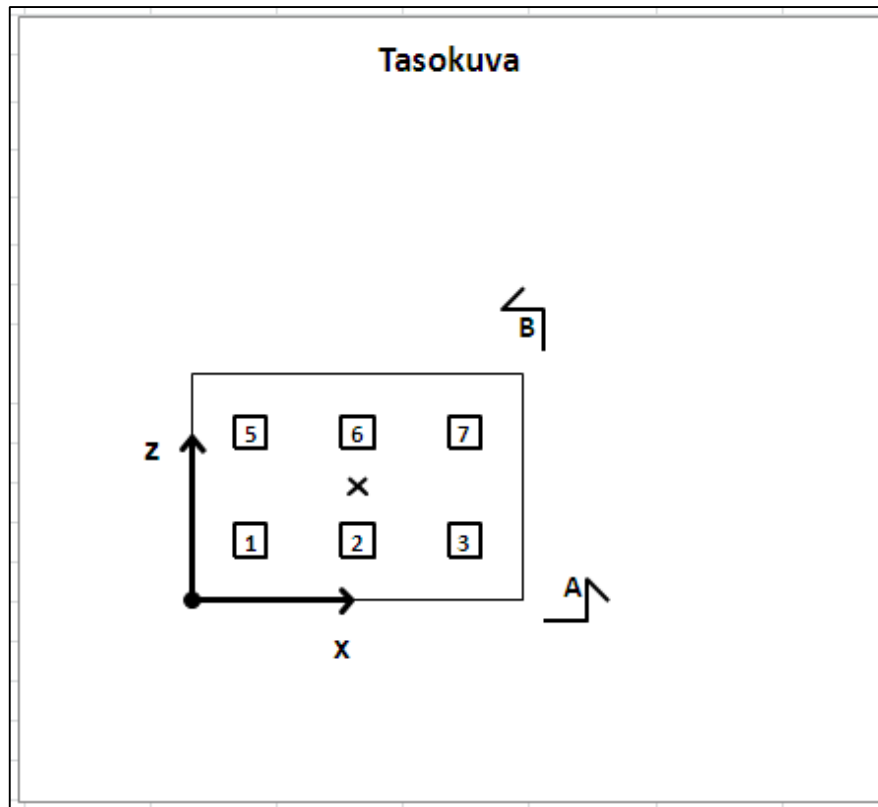
Lähtötietojen perusteella ohjelma laskee jokaiselle paaluryhmässä olevalle paalulle paalukuorman, joka on merkattu symbolilla P_i . Lähtötietojen suuret on määriteltä etukäteen, ja ne ovat nähtävissä alla olevasta kuvasta.

6	LÄHTÖTIEDOT:				
7					
8	Kuormitusresultantti $V=$				3000 kN
9	Resultantin sijanti x-suunnassa, $X_v=$				2,000 m
10	Resultantin sijanti z-suunnassa, $z_v=$				1,500 m
11	Ulkoinen momentti $M_x=$				200 kNm
12	Ulkoinen momentti $M_z=$				-200 kNm
13	Paalun sivumitta =				300 mm
14					
15	Paalut nro		x(m)	z(m)	P_i
16	1	kyllä ▼	1	1	516,7 kN
17	2	kyllä ▼	2	1	566,7 kN
18	3	kyllä ▼	3	1	616,7 kN
19	4	ei ▼	4	1	0,0 kN
20	5	kyllä ▼	1	2	383,3 kN
21	6	kyllä ▼	2	2	433,3 kN
22	7	kyllä ▼	3	2	483,3 kN
23	8	ei ▼	4	2	0,0 kN
24	9	ei ▼	1	3	0,0 kN
25	10	ei ▼	2	3	0,0 kN
26	11	ei ▼	3	3	0,0 kN
27	12	ei ▼	4	3	0,0 kN
28					

Kuva 10: Lähtötietojen syöttöalue

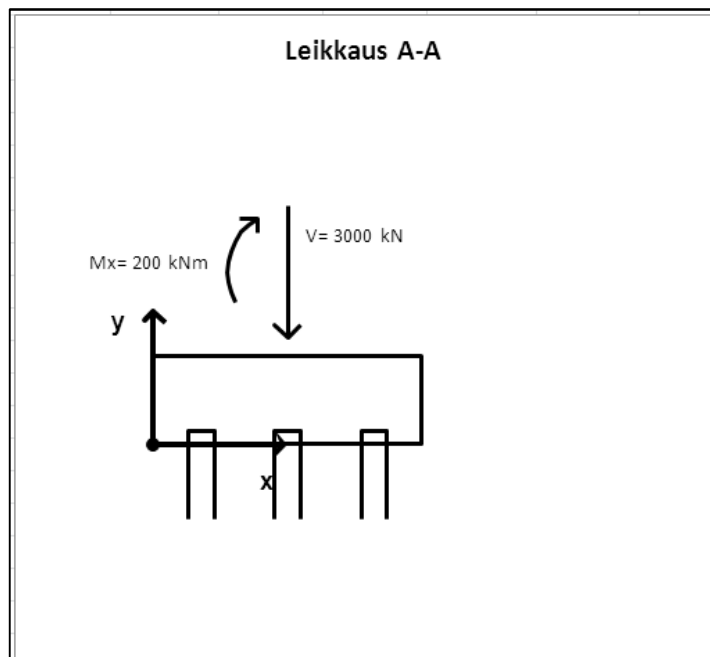
Välilehdellä on myös tasokuva paaluryhmästä sekä leikkaukset kahteen suuntaan, jotka muuttuvat lähtötietoja muutettaessa. Kuvien tarkoitus on sekä havainnollistaa tilannetta paaluryhmästä, että karsia virheitä lähtötietojen syötössä. Lähtötietoja syötettäessä voi helposti tulla virheitä ja kuvista on helppo todeta, näyttääkö paaluryhmä samalta kuin piirustuksissa.

Tasokuvassa, joka on esitetty kuvassa 11, näkyy paalut numeroituna ja kuormitusresultantin sijainti X-merkkinä. Anturan vasen alanurkka toimii koordinaatiston nollakohtana. Kuvasta näkyy myös leikkauskuvien suunnat.

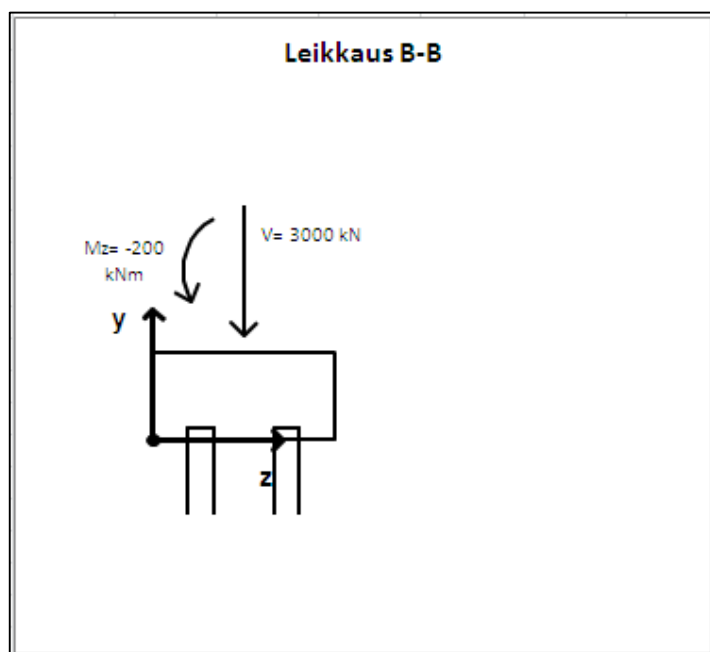


Kuva 11: Tasokuva

Alla olevista leikkauskuvista selviää kuormitusresultantin V sijainti ja suuruus ja mahdollisen momentin suunta ja suuruus. Taulukossa momentin positiivinen suunta on myötäpäivään ja negatiivinen suunta vastapäivään. Kuvissa momenttinuoli vaihtaa suuntaa riippuen momentin etumerkistä. Koordinaatiston nollakohta sijaitsee anturan vasemmassa alareunassa.



Kuva 12: Leikkaus A-A



Kuva 13: Leikkaus B-B

Taulukkoon on tehty huomautuskaavoja, joiden tarkoitus on minimoida virheitä laskennassa. Yksi kaava ilmoittaa kuormitusresultantin väärästä sijainnista. Toinen kaava huomauttaa, jos joku paaluista saa negatiivisen paalukuorman eli saa puristuksen sijaan vetoa. Nämä huomautukset ovat näkyvillä kuvassa 14.

LÄHTÖTIEDOT:				
Kuormitusresultantti $V=$		2000 kN		
Resultantin sijainti x-suunnassa, $X_v=$		3,000 m	HUOM! Tarkista V:n sijainti. Voima ei voi olla uloimman paalun ulkopuolella!	
Resultantin sijainti z-suunnassa, $z_v=$		1,500 m		
Ulkoinen momentti $M_x=$		0 kNm		
Ulkoinen momentti $M_z=$		0 kNm		
Paalut nro		x(m)	z(m)	P_i
1	kyllä	1	1	-1000,0 kN
2	kyllä	2	1	2000,0 kN
3	kyllä	1	2	-1000,0 kN
4	kyllä	2	2	2000,0 kN
5	ei			0,0 kN
6	ei			0,0 kN
7	ei			0,0 kN
8	ei			0,0 kN
9	ei			0,0 kN
10	ei			0,0 kN
11	ei			0,0 kN
12	ei			0,0 kN

Tasokuva

Kuva 14: Taulukko huomauttaa vetopaaluista ja V :n epämääräisestä sijainnista

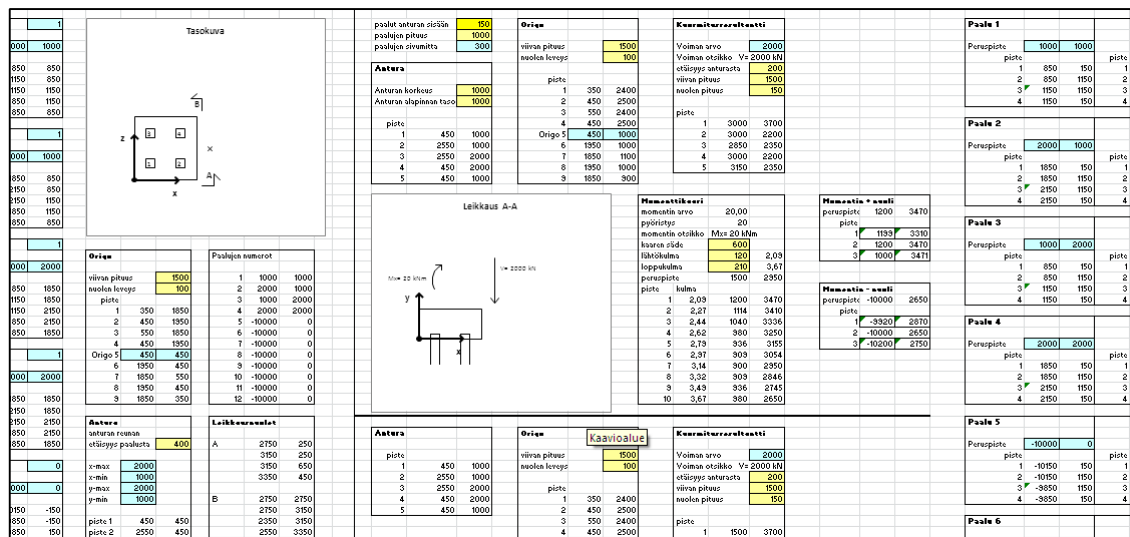
12.2 Laskut

Laskut-välilehdellä tapahtuu konkreettinen paalukuorman laskeminen. Kaava hakee ensimmäiseltä välilehdeltä käyttäjän syöttämät tiedot ja laskee paalukuormat paaluille. Tätä välilehteä käyttäjä ei voi muokata, se on lukittu. Käyttäjä voi kuitenkin tarkastella kaavaa ja tutkia, miten lasku kohta kohdalta etenee.

12.3 Kuvan piirto

Kuvan piirto-sivulle on koottu kaikki kaavat koskien *lähtötiedot*-sivulla olevia tasokuvaa ja leikkauskuvia. Kuvat ovat kaavioita, jotka on Excelin kaaviotyökaluja käyttämällä saatu näyttämään piirustuksilta. Jokainen asia, mikä kuvassa näkyy, on

täytynyt määritellä etukäteen. Kuvissa moni asia muuttuu lähtötietoja muutettaessa, joka on täytynyt ottaa huomioon kaavioita tehdessä. Alla olevasta kuvasta on helppo havainnoida, kuinka paljon asiaa *kuvan piirto-* välilehdellä on.



Kuva 15: Näkymä *Kuvan piirto-*välilehdeltä

Käyttäjälle on jätetty rajallinen mahdollisuus muokata kuvien ulkonäköä. Kuvissa voi muokata esimerkiksi paalujen kokoa, anturan reunan etäisyyttä paaluista, momentti- ja kuormitusresultanttinuolien kokoa sekä koordinaattinuolien kokoa. Näitä muokkaamalla käyttäjä voi saada helppolukuisemman kuvan, jos esimerkiksi kuvia täytyy tulostaa tai esitellä erilaisissa tilanteissa. Käyttäjä ei kuitenkaan voi muokata kaavoja tai vaikuttaa kuvan luettavuuteen negatiivisesti.

12.4 Ohjeet

Ohjeet-välilehdelle on kirjoitettu mahdollisimman yksinkertaiset ja tarkat ohjeet excelin käytöstä.

13 Loppusanat

Työn tavoite saavutettiin ja toimiva Excel-taulukko on nyt käytössä. Tekemäni laskentataulukko nopeuttaa suunnittelutyötä ja toivottavasti mahdollisimman moni suunnittelija yrityksessä pystyy hyödyntämään sitä. Toivon, että pääsen tulevaisuudessa hyödyntämään opinnäytetyössä oppimiani taitoja.

Lähteet

Jääskeläinen, Raimo, 2009. Pohjarakennuksen perusteet, Tampere: Tammertekniikka

Rantamäki, Martti & Tamminne Markku, 1979. Pohjarakennus, Helsinki: Otatieto

RIL 121-2004, 2004. Pohjarakennusohjeet, Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.

RIL 223-2005, 2005. Lyöntipaalutusohje LPO-2005, Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y.